

Évaluation de l'endommagement par fatigue des enrobés bitumineux Apports de la thermographie infrarouge

RÉSUMÉ

La fatigue des enrobés bitumineux constitue l'un des modes principaux de ruine des chaussées bitumineuses épaisses.

Ce phénomène est caractérisé en laboratoire par un essai de flexion d'une éprouvette trapézoïdale, sollicitée en tête par un déplacement sinusoïdal continu. Or la viscoélasticité des enrobés bitumineux est à l'origine d'une dissipation thermique au cours des essais et donc d'une diminution de rigidité liée à l'échauffement qui pourrait interagir avec le critère de rupture conventionnel.

Des études utilisant la thermographie infrarouge ont été menées sur ces essais. Elles permettent d'avoir accès à l'échauffement global de l'éprouvette pendant l'essai. Les résultats obtenus ont permis de caler un modèle de calculs aux éléments finis intégrant le couplage thermomécanique dans le matériau et donnant ainsi accès à la perte de rigidité de l'éprouvette liée à l'échauffement.

Les observations infrarouges renseignent également qualitativement sur la façon dont le matériau s'endommage : dommage diffus, localisation et propagation de fissure macroscopique.

MOTS CLÉS : 31 - Enrobé - Liant - Bitume - Endommagement - Fatigue (mater.) - Température - Enregistrement - Infrarouge - Essai - Déflexion - Laboratoire - Modèle mathématique.

Chantal de la ROCHE

ITPE
Section Liants et matériaux routiers
Division Matériaux et structures de chaussées

Jean CHARRIER

Assistant
Chef de section
Section Traitement d'images
Service Métrologie et instrumentation

Paul MARSAC

Technicien supérieur
Section Surface des chaussées et dynamique des véhicules
Division Gestion de l'entretien des routes

Jean-Marc MOLLIARD

Technicien supérieur
Section Traitement d'images
Service Métrologie et instrumentation
Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
Centre de Nantes

Introduction

Fonctionnement d'une chaussée bitumineuse épaisse

Les enrobés bitumineux, constitués d'un mélange de bitume et de granulats, font partie des matériaux constitutifs des chaussées routières. Lorsqu'ils sont utilisés pour la construction des couches liées les plus profondes (cas des chaussées bitumineuses épaisses), ils subissent à chaque passage de véhicules lourds des déformations en traction dont la répétition finit à la longue par fatiguer le matériau et conduit à une fissuration dommageable à la tenue de la structure (fig. 1).

Les essais de fatigue sur enrobés bitumineux

L'origine des essais de fatigue sur enrobés se trouve dans la comparaison des valeurs de déformations en traction par flexion, calculées à la base des couches d'enrobé, avec les valeurs de déformations maximales supportées par une éprouvette d'enrobé en laboratoire lors d'un essai de fati-

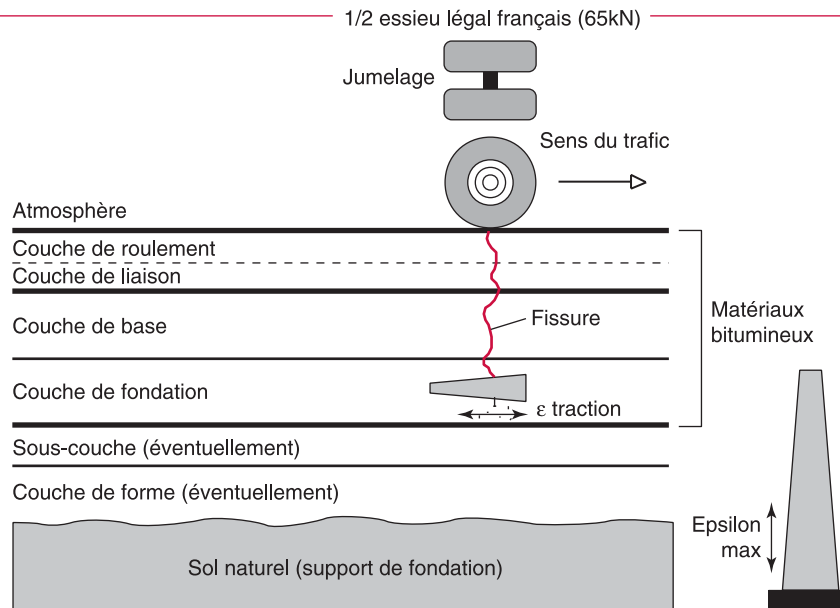


Fig. 1 - Principe de fonctionnement d'une chaussée bitumineuse épaisse et logique des essais de fatigue sur enrobés.

gue. En France, la caractérisation en laboratoire est réalisée par un essai en flexion deux points sur une éprouvette trapézoïdale d'enrobé bitumineux sollicitée en tête par un déplacement sinusoïdal continu. L'éprouvette est considérée comme rompue lorsque sa force de réaction en tête a été divisée par deux (fig. 2).

L'essai de fatigue en laboratoire permet de déterminer la déformation ϵ_6 conduisant à la rupture d'une éprouvette par fatigue sous certaines conditions d'essai (fréquence, température) pour 10^6 chargements. Le résultat de cet essai est à la base du dimensionnement des chaussées bitumineuses en France, il est donc de toute première importance de disposer d'un essai de fatigue pertinent vis-à-vis du comportement réel sur chaussées. Cela a conduit les chercheurs du domaine routier à s'intéresser depuis quelques années à l'essai de fatigue de façon plus phénoménologique et donc à essayer d'identifier les différents

phénomènes intervenant en cours d'essai. On peut citer parmi ceux-ci les phénomènes suivants qui ont fait l'objet de recherches à l'aide de mesures par thermographie infrarouge dont les résultats sont décrits dans la suite de cet article :

a - La dissipation thermique liée à la viscosité du matériau qui entraîne une augmentation de température dans le matériau.

Les enrobés bitumineux sont des matériaux viscoélastiques dont les caractéristiques dépendent fortement de la température (le module de rigidité diminue de 5 % lorsque la température augmente de 1 °C), cette dissipation thermique pourrait donc interagir avec le critère de rupture habituel et fausser l'interprétation de l'essai.

b - La part relative des phénomènes d'endommagement par microfissuration dans le matériau et de propagation d'une fissure macroscopique dans la durée de vie totale du matériau.

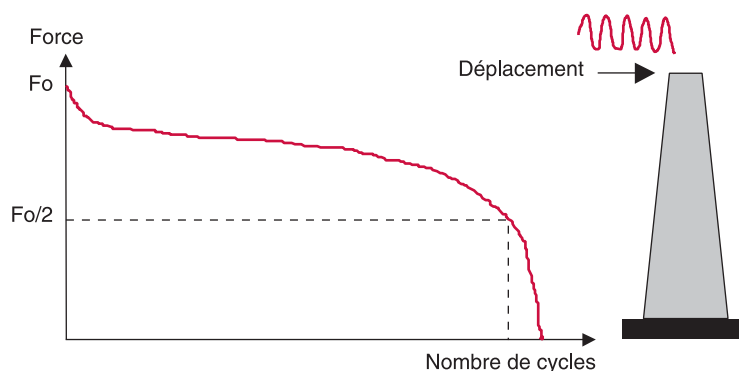


Fig. 2 - Schéma de principe de l'essai de fatigue à déplacement sinusoïdal imposé.

Campagne expérimentale de mesure d'échauffement en cours d'essai de fatigue

Les travaux présentés ici (de La Roche et *al.*, 1996(a), 1996(b), 1998) font suite aux premières études de ce type engagées au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées par (Stéfani, 1981), (Charrier, 1982) et (Piau et *al.*, 1983).

Matériau testé

Pour minimiser l'influence de l'hétérogénéité et de l'anisotropie du matériau, il a été décidé d'effectuer les essais de fatigue avec mesure de température sur du sable enrobé (mélange de bitume pur de classe 50/70), de fines (particules de diamètre maximal inférieur à 80 μm) et de sable (de diamètre maximal 2 mm). De plus, la teneur en liant a été choisie élevée (12 %) pour augmenter les effets du bitume sur le comportement « dissipatif » du matériau. Deux bitumes purs de provenance différente notés A et B ont été utilisés.

On trouvera (fig. 3) la courbe donnant la variation de la rigidité du sable enrobé au bitume B en fonction de la fréquence à différentes températures (obtenue à partir d'essais de module complexe (Huet, 1963)) qui illustre la susceptibilité thermique du sable enrobé et le couplage thermomécanique existant dans ce type de matériau.

Mesures de température

Deux types de mesures de température ont été effectués :

➤ Une thermosonde platine de surface (précision (0,2 °C) a été placée sur l'axe de symétrie de la face trapézoïdale de chaque éprouvette testée au niveau supposé de rupture déterminé par les essais de calage. Un suivi de l'évolution de cette température a été effectué (information locale).

➤ Un système de thermographie infrarouge (précision (0,2 °C) a permis de visualiser, mais également de quantifier l'échauffement de surface dans l'espace et dans le temps. Les essais ont été effectués dans une pièce à température ambiante plutôt qu'à 10 °C sous atmosphère ventilée (conditions de l'essai normalisé) afin d'éviter une dissipation accélérée de la chaleur par convection forcée sur la surface étudiée. Il a cependant été vérifié au long des essais que la température ambiante est restée constante à 1 °C près.

Le système de thermographie infrarouge comprend :

- une caméra infrarouge AGA Thermovision 780 SW,
- un micro-ordinateur chargé d'un logiciel de traitement d'image PTR 9010 conçu par Additional Euro Technologies. Ce système permet à la fois de visualiser l'image infrarouge en fausses couleurs, mais également de la traiter : moyenne sur une zone donnée, par exemple.

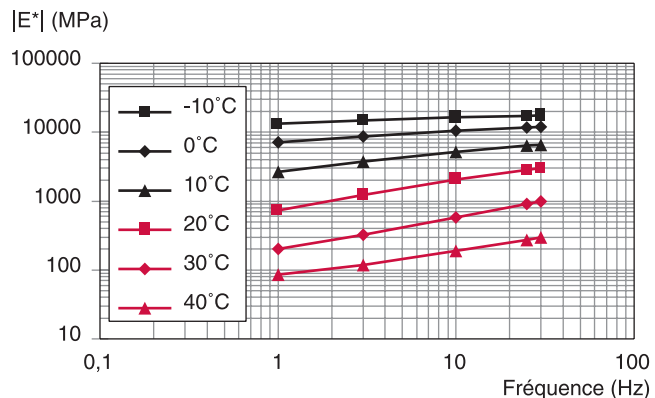
Un calage initial des températures par rapport à la sonde a été réalisé, le démarrage de l'essai se faisant à température ambiante donc sans qu'il soit possible de distinguer l'éprouvette dans son environnement. Seules les variations de températures nous intéressant, la valeur exacte de l'émissivité de l'enrobé n'était pas nécessaire. Celle-ci a été prise égale à 0,75.

Essais de fatigue – Résultats expérimentaux

Les essais de fatigue réalisés sont des essais en flexion deux points sur éprouvettes trapézoïdales (25 × 56 × 250 × 25 mm) à déplacement imposé sinusoïdal, en continu à 25 Hz.

Les niveaux de déformation appliqués au sable bitume ont été choisis suffisamment élevés pour accentuer les phénomènes et aboutir à des durées d'essais de 15 min à 5 h ($\epsilon \approx 570 \cdot 10^{-6}$).

Fig. 3 - Isothermes du module complexe – sable enrobé au bitume B.



Différents types d'essais ont été réalisés, en faisant varier les niveaux de déplacement appliqués à l'éprouvette.

On trouvera (fig. 4) une description synthétique des résultats des essais A39 et B10 et A20 effectués sur les sables enrobés A et B. Les essais A39

et B10 sont représentatifs des essais à même déformation ($\epsilon = 573 \cdot 10^{-6}$). Les essais B10 et A20 sont des essais réalisés à des niveaux de déformation différents, mais conduisant à des niveaux de force initiale identiques (par la différence de rigidité des matériaux) et aboutissant à des durées de vie similaires.

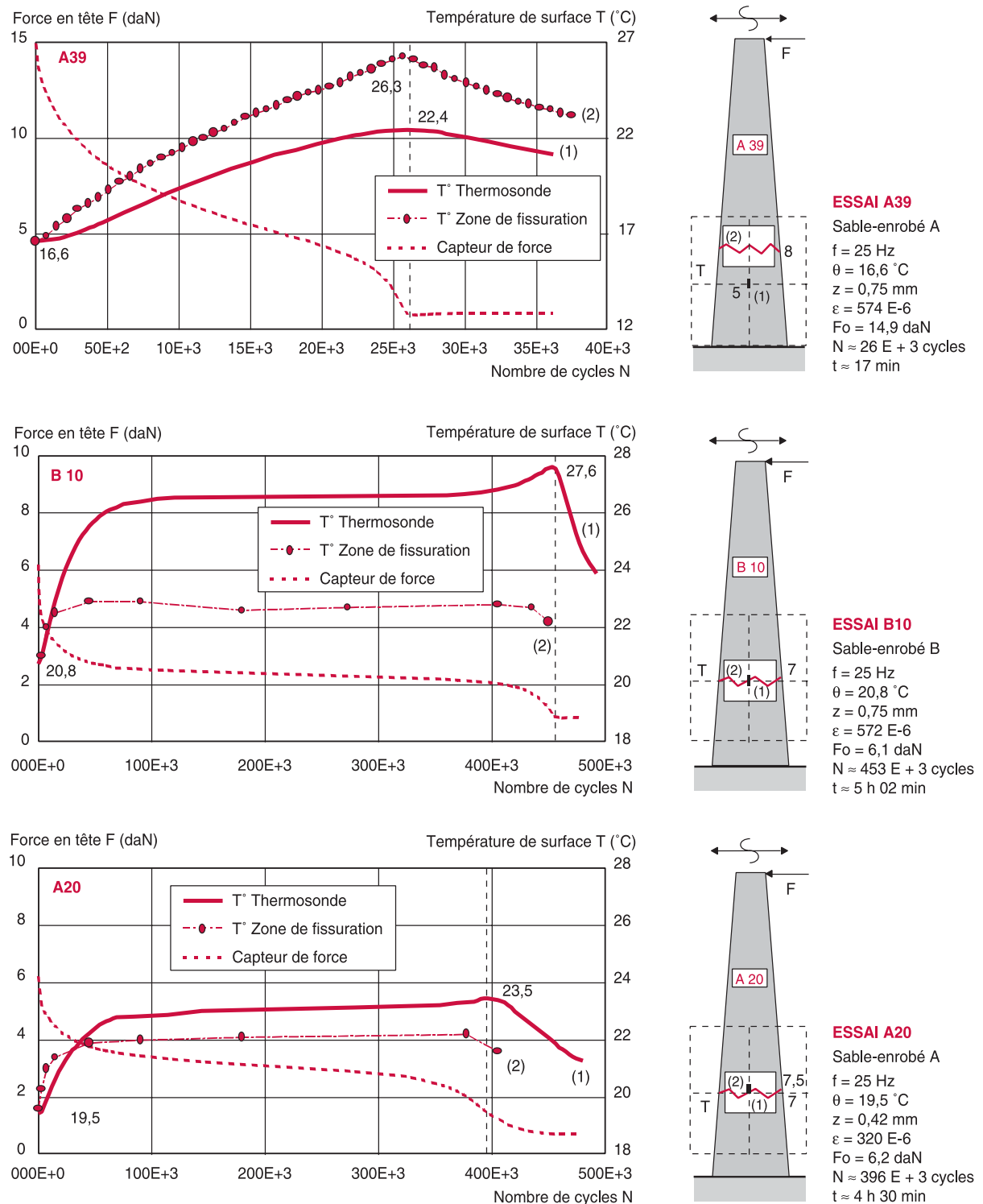


Fig. 4 - Résultats des essais sur sables enrobés.

Les notations sont les suivantes :

f : fréquence des sollicitations,
 θ : température ambiante d'essai,
z : flèche en tête,
 ε : déformation,
 F_0 : force en tête en début d'essai,
N : nombre de cycles correspondant à la température maximale relevée,
t : temps nécessaire pour atteindre la température maximale.

L'éprouvette trapézoïdale représentée pour chaque essai indique la position de la sonde platine (correspondant à la courbe (1)), la zone de visualisation 10 × 10 cm par thermographie infrarouge matérialisée en traits pointillés ainsi que la zone sur laquelle a été effectuée la moyenne en température (correspondant à la courbe (2)), recouvrant la fissure réellement observée sur l'éprouvette.

Les chiffres indiquent respectivement la hauteur de la sonde et de la fissure en centimètres par rapport à la base de l'éprouvette. Les graphiques associés à chacun des essais représentent la force en tête de l'éprouvette en fonction du nombre de cycles de sollicitations ainsi que les courbes d'évolution de la température (1) et (2).

Correspondance variation du module/température

Sur le plan qualitatif, les résultats obtenus confirment l'existence de trois phases distinctes d'évolution du module :

- une première phase d'évolution très rapide de la température correspondant à une chute brutale du module,
- une seconde phase de décroissance lente du module correspondant à un régime permanent en température. Cette seconde phase n'existe pas dans le cas de l'essai A39, la durée de l'essai étant trop courte pour autoriser l'établissement du régime permanent,
- une troisième phase correspondant à la propagation de fissure, décroissance rapide du module et concentration de la chaleur dans la zone de contraintes maximales (correspondant à la fissuration). Parallèlement, on observe une décroissance globale de la température moyennée sur la zone de fissuration.

La comparaison des résultats d'échauffement enregistrés à partir de la sonde et des mesures par thermographie infrarouge sur la zone de fissuration met en évidence le caractère local et donc peu représentatif de l'information délivrée par la sonde suivant qu'elle est placée sur la fissure : elle enregistre alors le maximum local de température au

moment de la fissuration, ou en dehors de cette zone : elle sous-estime alors la température atteinte par l'éprouvette. Ce cas montre tout à fait l'intérêt, pour des essais non homogènes, d'effectuer des mesures de température par thermographie infrarouge.

L'observation des films permet de confirmer l'hypothèse selon laquelle le déplacement des zones chaudes situées sur chaque flanc de l'éprouvette est lié à des phases précises du processus de rupture. Le cas présenté illustre un comportement symétrique de l'éprouvette (fig. 5). Un comportement dissymétrique (fissuration de l'un des bords puis de l'autre) peut également être observé dans certains cas.

Sur le plan quantitatif, les mesures effectuées mettent en évidence pour les matériaux testés avec des niveaux de sollicitation très importants, des augmentations importantes de température par dissipation au cours des essais de fatigue (ces variations peuvent atteindre 10 °C), phénomène dont il convient de tenir compte pour interpréter l'essai lorsque celui-ci est effectivement réalisé avec des niveaux de déformation importants.

Modélisation associée – Conséquences

Les mesures réalisées ont également permis de suivre l'évolution des températures maximales de l'éprouvette en cours d'essai. À partir de ces données, une modélisation par éléments finis incluant le couplage thermomécanique des enrobés a été réalisée. Cette modélisation a permis de donner quelques indications sur la part relative de chute de rigidité liée aux phénomènes thermiques dans les essais de fatigue.

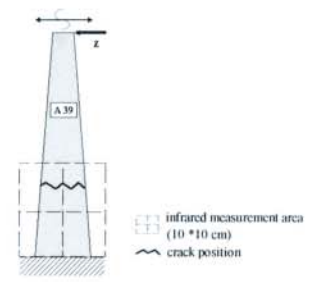
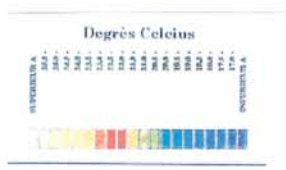
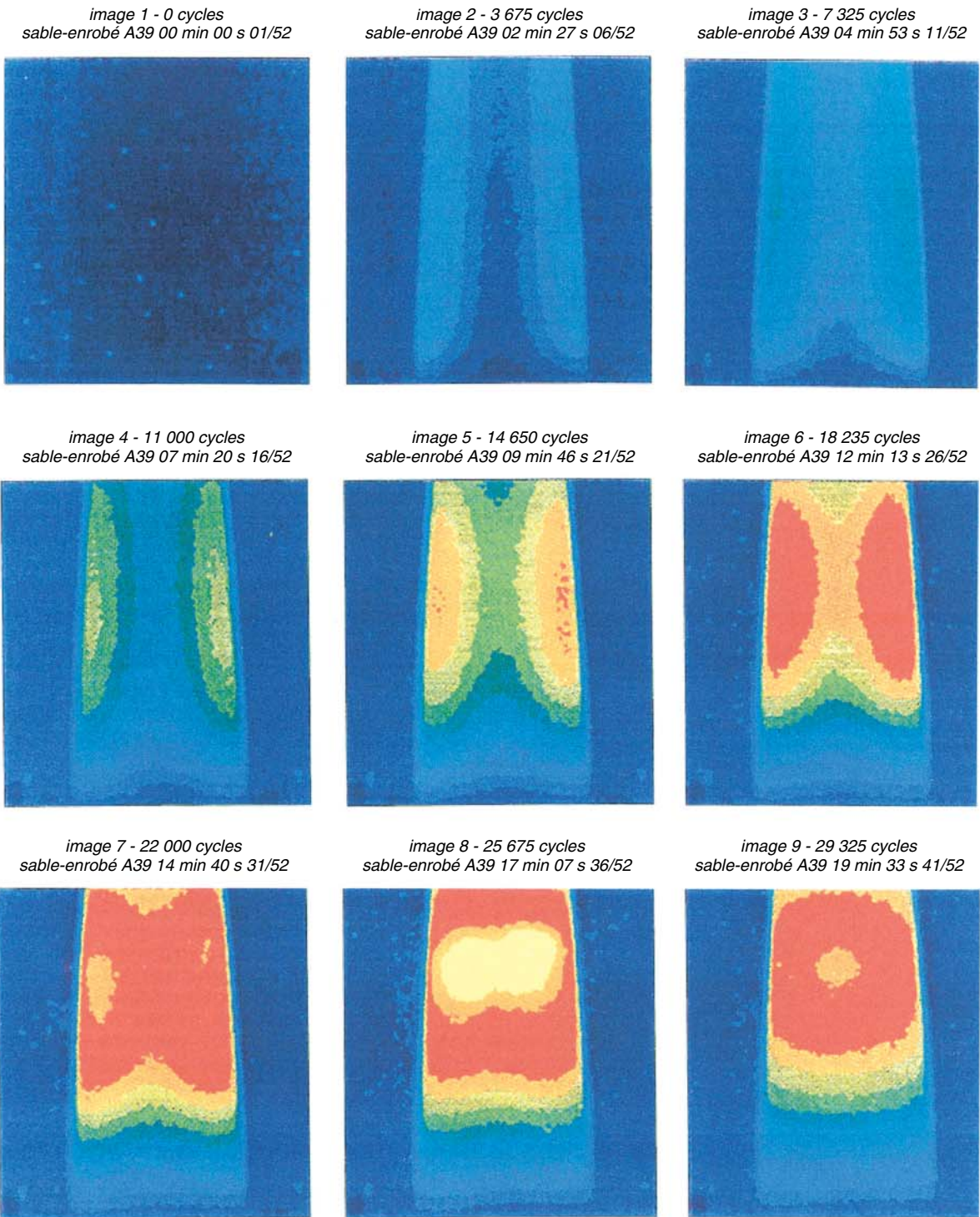
On trouvera dans (l'article de la Roche et *al.*, 1998) le détail de la modélisation par éléments finis réalisée sur ces essais. Le principe en est le suivant : dans le cadre des sollicitations sinusoïdales appliquées pendant les essais de fatigue, l'énergie visqueuse dissipée en cours d'essai est considérée comme totalement transformée en chaleur et les effets thermomécaniques sont décrits à travers le modèle rhéologique de Huet-Sayegh (Sayegh, 1965).

La validation du modèle proposé a été effectuée sur les essais de flexion sur éprouvettes trapézoïdales de sable-enrobé au bitume A.

Les conditions d'essais, entrées dans le modèle sont les suivantes :

- Fréquence : 25 Hz.
- Température extérieure : 17 °C.

Fig. 5 - Observations à la caméra infrarouge au cours de l'essai A39.



- Déplacement en tête : 0,75 mm (correspondant à $\varepsilon = 572 \cdot 10^{-6}$).
- $|E^*|$ (17 °C, 25 Hz) = 5 210 Mpa.
- Angle de phase (17 °C, 25 Hz) = 25,6°.
- Conductivité : 0,6 W/m°C,
- Capacité calorifique volumique = $1,2 \cdot 10^6$ J/m³°C.
- Coefficients d'échange : $\lambda = 13$ W/m²°C sur les faces libres de l'éprouvette.
- $\lambda = 55$ W/m²°C sur les faces collées aux casques de fixation.

À partir des données précédentes, la figure 6 regroupe les isothermes calculées pour trois pas de temps :

- $t = 144$ s (correspondant à $144 \times 25 = 3\,600$ cycles à 25 Hz),
- $t = 736$ s (correspondant à 18 400 cycles à 25 Hz),
- $t = 1024$ s (correspondant à 25 600 cycles à 25 Hz).

Ces isothermes calculées sont à comparer aux isothermes visualisées à la caméra infrarouge pour des nombres de cycles sensiblement équivalents à ceux calculés (images 2, 6 et 8 de la figure 5).

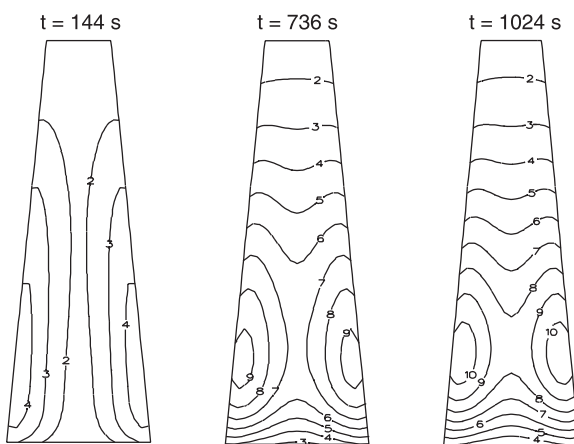


Fig. 6 - Champs de température simulés (isotherme n° 1 = 0 °C, ΔT entre 2 isothermes = 1 °C).

Pour les deux premiers pas de temps ($t = 144$ s et $t = 736$ s), les champs de température simulé et visualisé par thermographie infrarouge sont très similaires.

Étant donné l'absence de modélisation d'endommagement dans le calcul, la similitude ne persiste pas. La simulation évolue vers un régime stationnaire en température tandis que dans la réalité, la caméra infrarouge montre la migration des points chauds vers le centre de l'échantillon correspondant à la propagation d'une fissure macroscopique dans l'échantillon.

Cette première modélisation permet également de déterminer la part relative de diminution de module liée à l'échauffement dans les essais de fatigue. Elle met ainsi en évidence le rôle important joué par la température dans le cas des essais à très fort niveau de déplacement et remet dans ce cas en question le critère usuel de rupture utilisé dans les essais de fatigue (diminution par deux de la rigidité des éprouvettes).

Cette modélisation, validée sur les essais décrits précédemment, a été appliquée à différentes géométries d'éprouvettes, pour différents types et niveaux de sollicitation. Elle montre que dans le cas de l'essai en flexion deux points sur éprouvette trapézoïdale, à déplacement imposé, à 10 °C, 25 Hz, les augmentations de température maximales restent limitées à quelques degrés et ne perturbent donc pas de manière significative le résultat de l'essai, par contre cette influence devient plus importante pour les essais réalisés à plus haute fréquence, sur des éprouvettes plus massives présentant une surface d'échange moins importante avec le milieu extérieur et dans le cas de l'application de niveaux de sollicitations très importants destinés à réduire les durées d'essai comme c'est le cas par exemple pour les essais de fatigue en compression diamétrale.

Cette étude a donc permis d'identifier l'un des phénomènes existant lors des essais de fatigue (il s'agit là d'un phénomène parasite). Les recherches ont été poursuivies avec la thermographie infrarouge pour tenter de suivre plus précisément l'endommagement dans l'éprouvette en cours d'essai.

Suivi de l'endommagement par thermographie infrarouge

Hypothèses

L'énergie dissipée dans l'éprouvette sous sollicitations cycliques est proportionnelle à plusieurs paramètres : la contrainte, la déformation, la fréquence, l'angle de déphasage. La dissipation thermique dans les enrobés testés est donc plus importante dans les zones les plus sollicitées mécaniquement. La thermographie infrarouge permet donc de localiser les zones correspondant aux zones d'endommagement de l'éprouvette comme cela a été montré dans le paragraphe précédent (fig. 5).

De plus, lorsque le matériau se fissure, une concentration de contraintes associée à une dissipation

complémentaire visqueuse et plastique apparaît en pointe de fissure. Cette dissipation visqueuse supplémentaire engendrant une augmentation de chaleur, on suppose que l'amorce de la fissuration serait localisée par l'accroissement brutal des variations de température au lieu des points les plus chauds de l'éprouvette correspondant aux fronts de fissure et là où la sollicitation est la plus importante. C'est ce qui a motivé une seconde campagne expérimentale.

Campagne expérimentale

L'étude porte sur des enrobés bitumineux de trois granulométries différentes : un sable-enrobé 0/2 (taille maximale des granulats 2 mm), deux enrobés bitumineux 0/6 mm et 0/14 mm.

Les éprouvettes sont sollicitées à différents niveaux de déformation. Certaines sont également pré-fissurées afin d'influencer le point de départ de la fissuration. Un trait de peinture métallique a été appliqué sur les faces latérales des éprouvettes afin de déterminer le moment où la fissure apparaît sur les bords. Lorsque le trait de peinture se rompt, il y a une coupure du circuit électrique.

Mesures par thermographie infrarouge

Pendant toute la durée des essais, des mesures de température de surface ont été effectuées par thermographie infrarouge à l'aide du système suivant :

- > caméra AGA thermovision 780 SW,
- > logiciel d'acquisition et de traitement HELIOS, mis au point par la section traitement d'image du LCPC (Charrier et Moliard, 1997).

Ce système permet de visualiser les points chauds sur l'éprouvette au moyen d'images enregistrées tout au long de l'essai de fatigue. On peut ainsi diviser l'essai en plusieurs phases (échauffement le long des flancs puis progression des sources de chaleur à la rencontre l'une de l'autre, puis concentration de chaleur et augmentation jusqu'à la température maximale avant refroidissement). Le traitement dans un premier temps consiste à sélectionner visuellement pour chacune de ces étapes les zones les plus chaudes de l'éprouvette. On les isole au moyen d'AOI (Area Of Interest), définies manuellement par l'utilisateur et que l'on ajuste au mieux sur ces zones chaudes. Le logiciel de traitement d'images HELIOS moyenne automatiquement les températures pour toutes les AOI et toutes les images de l'essai.

On applique la même procédure de moyennage des températures en plaçant une deuxième série d'AOI sur le profil de la fissuration obtenu en fin d'essai après rupture manuelle de l'éprouvette.

On obtient ainsi un ensemble de données de variations de températures en fonction du temps traitées graphiquement sous EXCEL et destiné à fournir les renseignements suivants :

- > localisation temporelle de l'initiation de la fissure,
- > vitesse de propagation de la fissure,
- > trajet suivi par la fissure.

Dans chaque ensemble de données traitées, on recherchera une concordance éventuelle entre l'évolution de la température et la courbe de force.

Localisation temporelle de l'initiation de fissure

À partir des calculs de résistance des matériaux, on constate que la déformation est maximale sur les bords de l'éprouvette, ce qui permet de situer le départ de fissure théorique à cet endroit puis une propagation vers l'intérieur du matériau. Les observations faites à la caméra infrarouge corroborent cette hypothèse : on observe un déplacement de zones chaudes des bords vers l'intérieur de l'éprouvette. Par contre, la thermographie infrarouge ne permet pas d'observer précisément le démarrage de la fissure sur les bords de l'éprouvette. C'est dans ce but que nous avons réalisé le montage avec la peinture métallique. Mais nous n'avons pas eu d'observations se recoupant avec les images thermiques. En effet, soit le matériau casse sans que la peinture métallique soit rompue, soit l'endommagement de l'éprouvette se fait par l'intermédiaire de microfissures indécélables par ce procédé et la macrofissure apparaît de façon aléatoire.

D'autre part, l'accroissement de la dissipation thermique en pointe de fissure n'a pu être observé. Cette méthode utilisée pour la détection de fissures lors d'essais de fatigue sur éprouvettes métalliques ne peut être employée sur les éprouvettes d'enrobés. Il semblerait que le dégagement de chaleur dû à la viscosité du bitume soit prépondérant devant une augmentation d'énergie supplémentaire due à une apparition de fissure.

Les moyens disponibles ne nous ont donc pas permis de déterminer le lieu de l'amorce de fissure, qui était l'un des objectifs de cette étude. Toutefois, si le résultat escompté au départ n'est pas là, d'autres constatations intéressantes ont été mises à jour.

Trajet suivi par la fissure

Première constatation faite à partir du dépouillement sur le logiciel HELIOS : le trajet des points les plus chauds correspond bien à la position de la

fissure finale. Comme le montre la figure 7, le profil de rupture de l'éprouvette obtenu à la fin de l'essai par rupture manuelle est au lieu des AOI localisées sur les zones chaudes.

Ce schéma retrace l'évolution géographique des barycentres des zones chaudes d'une éprouvette au cours du temps. Chaque série de points correspond à l'évolution du barycentre d'une AOI. Peu à peu la zone chaude se concentre sur la zone de fissuration. À partir de $t = 250$ secondes côté gauche et $t = 650$ secondes côté droit, les zones chaudes se déplacent le long du profil de fissuration obtenu en fin d'essai.

D'autre part, sur les courbes de montée en température pendant l'essai, on peut localiser deux phénomènes distincts. Ils se produisent toujours en premier sur les AOI les plus proches des bords, puis vers l'intérieur.

Le phénomène le plus évident est le passage de la courbe de température par une tangente horizontale avant de décroître. On peut alors supposer que si la fissuration a eu lieu (macrofissures), il n'y a plus de dissipation thermique dans cet endroit de l'éprouvette et donc elle refroidit. Ce refroidissement correspond au déplacement des zones chaudes vers l'intérieur de l'éprouvette. De plus, ce moment se situe dans 80 % des cas à partir de $F_0/3$ sur la courbe de force sans que l'on observe sur cette courbe de point caractéristique (changement de pente, etc.).

On observe également une phase de diminution de pente des courbes de température. Ce changement de pente apparaît de façon aléatoire entre F_0 et $F_0/2$ sans que cette apparition ne concorde avec un moment précis de la courbe de force ni que ce soit localisé visuellement sur les images infrarouges.

Vitesse de propagation des points chauds

Cette vitesse est mesurée à partir des courbes de température au point de passage des tangentes horizontales de deux AOI contiguës. Pour les éprouvettes à même granulométrie et à même déformation en tête, bien qu'on ne retrouve aucune similitude dans leur durée de vie ni dans l'instant où l'on observe une première tangente horizontale supposée être une première fissuration, on constate que la vitesse de transmission d'une AOI à la suivante est sensiblement la même d'un essai à l'autre à 10 % près.

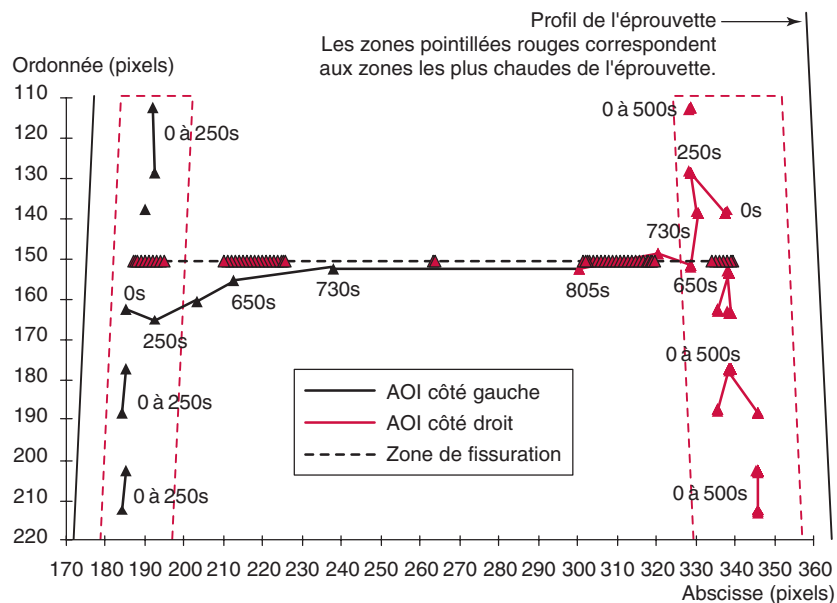
De plus, plus l'essai avance, plus la vitesse de propagation est rapide. Celle-ci gagne de 30 à 50 % de sa valeur d'une AOI à l'autre, toutes granulométries confondues. On suppose donc qu'il y a accélération de la fissuration au fur et à mesure de l'avancement de l'essai.

Conclusions et perspectives

Les études entreprises sur la fatigue des enrobés bitumineux ont largement fait appel aux mesures par thermographie infrarouge.

Cette technique a permis, dans un premier temps, d'évaluer l'échauffement de surface d'une éprouvette en cours d'essai de fatigue. Les résultats obtenus confirment ceux déjà acquis en matière de courbe de variation du module en cours d'essai de fatigue : à savoir une relation directe entre la période thermique transitoire (augmentation de la température) et la première partie de la courbe d'évolution du module correspondant à une chute importante, puis un palier correspondant au régime permanent en température et enfin, une

Fig. 7 - Essai sur sable-enrobé, coordonnées barycentriques des zones les plus chaudes et de la zone de fissuration.



chute brutale correspondant à la fissuration totale de l'éprouvette. Ils mettent de plus en évidence l'importance du phénomène d'échauffement en cours d'essai pour les niveaux de sollicitation élevés et ont permis de caler un modèle numérique permettant d'évaluer la part relative liée à l'augmentation de température dans la chute de module et de mieux évaluer sous cet angle la pertinence des essais de fatigue en terme de prévision des durées de vie sur chaussées.

Dans un second temps la thermographie infrarouge a été utilisée pour suivre l'endommagement et la fissuration macroscopique dans les éprouvettes d'enrobé sollicitées en fatigue. Si les mesures effectuées ont pu nous éclairer sur l'apparition

d'une fissure macroscopique dans l'échantillon et sa vitesse de propagation au sein du matériau, il nous a été impossible, avec la technique employée de visualiser l'endommagement local (microfissuration) dans le matériau, la dissipation locale étant masquée par la dissipation globale visqueuse dans le matériau.

Une des possibilités pour suivre cet endommagement consiste à s'intéresser à la dissipation engendrée au cours d'un cycle de sollicitation, cela nécessite de démoduler le signal fourni par la caméra infrarouge en phase avec le signal d'excitation de l'éprouvette. Ces essais sont en cours à l'aide d'une nouvelle caméra matricielle de grande précision acquise récemment au LCPC.

Remerciements. Les auteurs remercient les étudiants qui, dans le cadre de leur stage au LCPC, ont contribué à l'obtention des résultats présentés dans cet article : Nicolas Sanson (stage de DEA, université de Nantes, 1994) et Claire Valles (stage de fin d'études, ENSAIS, 1998).

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

CHARRIER J. (1982), *Étude thermique des phénomènes de fatigue dans les matériaux composites bitumineux*, 1res journées de thermographie infrarouge.

CHARRIER J., MOLIARD J.-M. (1997), *HELIOS, logiciel d'acquisition et de traitement d'images infrarouges*, Manuel d'utilisation, Document LCPC.

de la ROCHE C., MARSAC P. (1996-a), *Caractérisation expérimentale de la dissipation thermique dans un enrobé bitumineux sollicité en fatigue*, Proceedings of the Eurobitume Congress, May, Strasbourg.

de la ROCHE C. (1996-b), *Module de rigidité et comportement en fatigue des enrobés bitumineux. Expérimentations et nouvelles perspectives d'analyse*, Thèse de Doctorat, École Centrale, Paris.

de la ROCHE C., PIAU J.-M., DANGLA P. (1998), *Thermal effects induced by viscoelastic dissipation during fatigue tests on bituminous mixtures*, 6th Inter-

national Symposium on Creep and Coupled Processes, Bialowieza, September 23-25, Poland.

HUET C. (1963), *Étude par une méthode d'impédance du comportement viscoélastique des matériaux hydrocarbonés*, Thèse de Docteur-Ingénieur, Faculté des Sciences de Paris.

PIAU J.-M., ROUSSET G. (1983), *Modélisation de l'endommagement dans une éprouvette de sable bitumineux au cours d'une expérience de flexion alternée*, Mémoire de DEA, École Polytechnique, Paris.

SAYEGH G. (1965), *Contribution à l'étude des propriétés viscoélastiques des bitumes purs et des bétons bitumineux*, Thèse de Docteur-Ingénieur, Sorbonne, Paris.

STEFANI C. (1981), *Étude thermique des phénomènes de fatigue dans les matériaux composites bitumineux*, Journées de physique LCPC, Les Arcs, décembre.

ABSTRACT

An assessment of fatigue damage in bituminous mixes. Contribution of infrared thermography

Ch. de LA ROCHE, J. CHARRIER, P. MARSAC, J.-J. MOLIARD

Fatigue in bituminous mixes is one of the principal failure modes of thick bituminous pavements.

In the laboratory this phenomenon is studied by conducting a bending test on a trapezoidal specimen to the top of which a continuous displacement is applied. However, the viscoelasticity of bituminous materials results in the dissipation of heat during the tests and a reduction in stiffness as a result of heating which could interact with the conventional failure criterion.

Infrared thermography was used to examine these tests. The results allow us to measure the overall heating of the specimen during the test and have been used to adjust a finite element model that includes thermomechanical coupling in the material and thereby permits the specimen's loss of rigidity as a result of heating to be established.

The infrared observations also provide qualitative information about the damage process in the material, with regard to the diffuse nature of damage and the location and propagation of macroscopic cracks.